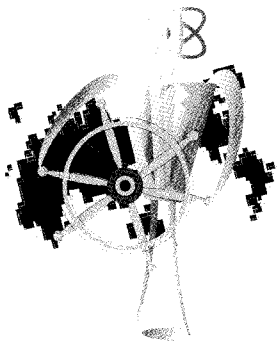


원자력 이용 수소 생산 기술 개발 장기 계획

이원재

한국원자력연구원 수소생산원자로기술개발부 부장

수소경제와 원자력수소



21세기 들어 화석연료의 고갈과 자원의 편재에 따른 국가 에너지 안보 확보, 그리고, 지구 온난화에 의한 기후 변화 문제로 전 세계가 몸살을 앓고 있다.

전 세계 에너지의 86%를 석탄, 천연가스, 석유 등 화석 연료에 의존하는 현 상황에서 (EIA (2007)), 화석 연료를 대체할 수 있는 미래 에너지 기술의 개발은 무엇보다 시급하다.

화석 연료 고갈 및 기후 변화 대응으로, 세계 선진국은 기존의 자원 의존형 에너지 체계로부터 기술 주도형 청정 에너지 체계로의 전환을 통하여 자국의 지속 가능한 성장, 에너지 안보 및 환경 문제 해결을 모색하고 있다.

이중, 화석 연료를 대체할 미래 에너지로 가장 각광을 받고 있는 것이 수소에너지이다. 수소는 지

구상의 무한한 자원인 물로부터 얻어지며, 타고나서 다시 물로 변환되므로 환경 오염이 없는 지속 가능한 청정 에너지 매체이다.

또한 전기 에너지와는 달리 저장과 이송이 가능하고, 타면서 석유의 3배에 해당하는 에너지를 발생하므로 에너지 활용도 및 경제성이 높다.

이에 세계 선진국은 수소를 주 연료로 사용하는 수소경제를 이제는 선택이 아닌 피할 수 없는 미래로 인정하고, 2020년대 중반 수소경제 진입을 목표로 국가 차원의 수소경제 마스터플랜을 수립하여 기술 개발에 노력을 경주하고 있다.

수소경제 진입에는 수소 생산, 저장·공급 및 이용 기술의 개발이 요구된다. 선진국은 이산화탄소 배출이 없는 원자력수소를 중앙 집중식 청정 대량 수소 생산의 현실적 방안으로 선정하고, 기술



서울대 원자핵공학과 박사
한국원자력연구원(1981~)

〈표 1〉 우리나라의 수소경제 진입 기술 개발 현황

생산 기술	저장·수송 기술	이용 기술
원자력수소사업 고효율수소사업단 (교육과학기술부)	고효율수소사업단 (교육과학기술부)	수소연료전지사업단 (지식경제부)
1) 청정 물분해 (미래) - 원자력 : 대량 생산 - 재생 에너지 : 소량 생산 2) 화석 연료 분리 (현재) - 천연가스 증기 개질 등 - 이산화탄소 포집 필요 '30년대 상용화(미래 기술)	1) 저장 - 고압 가스, 액체수소 - 화학/금속 수소화물 2) 수송 - 배관망(NG), 운송 - 충전소, 인프라 구축 '20년대 상용화(시장진입)	1) 소형/가정용 (< 3kWe) - PEMFC, DMFC, ... 2) 수송용 (< 75kWe) - PEMFC 3) 발전용 (> 250kWe) - SOFC, MCFC '20년대 상용화(시장진입)
선진국 : '20년대 중반 상용화 및 수소경제 진입 목표		

개발에 국가 차원의 집중적인 투자를 하고 있다.

원자력수소는 950oC에서 안전 운전이 가능한 초고온가스로의 고열을 이용하여 물을 열화학 또는 고온 전기 분해 방법으로 직접 분해하여, 대량의 수소를 안전하며, 깨끗하고, 경제적으로 생산하는 기술이다.

미국은 에너지정책법(2005)으로 전력·수소 생산 차세대 원자로시스템(NGNP: Next Generation Nuclear Plant)의 개발 및 실증을 법제화하고, 2018년 원형 시스템 완공, 2022년 실증을 목표로 총4조원 규모의 예산을 투입할 계획이다. 수소 생산 방법으로 요드-황 및 Hybrid-황 열화학 방법과 고온 전기 분해방법을 대상으로 기술 개발을 수행하고 있다.

일본도 국가 계획으로 현재 가동중인 30MWth급 HTTR(High Temperature Test Reactor) 연구로에 요드-황 열화학 수소 생산 시스템을 병합하여, 2015년까지 수소 생산 실증을 완료하고, 2020년대 중반까지 원자력수소 상용

시스템 개발을 목표로 하고 있다.

원자력수소에 대한 선진국의 기술 개발 의지는 제4세대원자로 국제포럼(GIF: Gen-IV International Forum)에도 가장 많은 국가가 참여하는 것으로도 알 수 있다. GIF에는 세계 8개국이 참여하고 있으며, 2개국이 추가 참여할 예정이다.

우리나라 에너지의 현주소를 살펴보면, 2006년도 현재 1차 에너지의 97%를 수입에 의존하고 있는데, 이중 44%가 석유이며 석유의 80%는 지정학적으로 불안한 중동에 의존하고 있다. 또한 과다한 화석 연료 사용으로 OECD 국가 중 이산화탄소 배출 증가율 1위이며, 최근 세계 평균의 2배에 달하는 기후 변화의 직접적인 영향을 받고 있다.

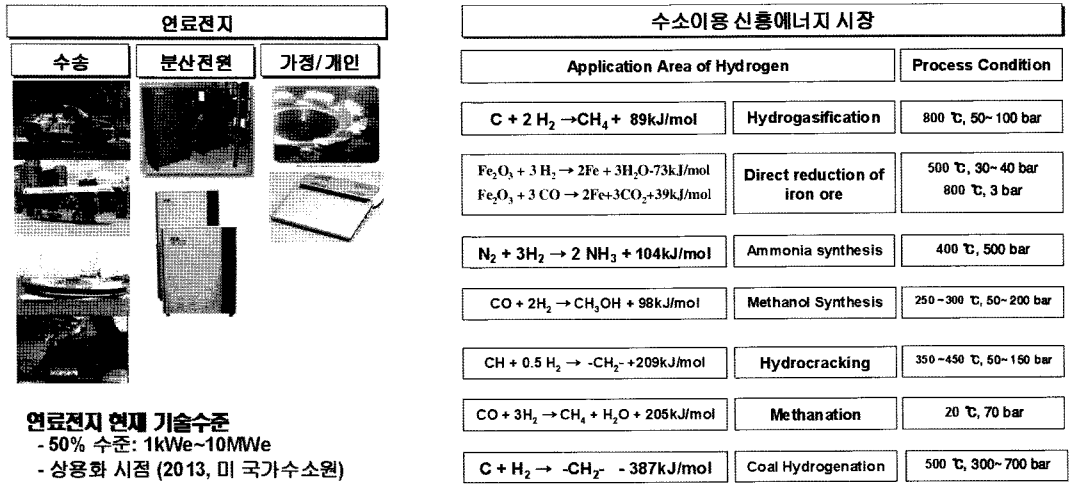
따라서 화석 연료 고갈 및 기후 변화에 대응한 미래 에너지로서 수소의 역할 정립과 수소경제로의 전환은 어느 나라보다 시급하다. 이에 우리 정부도 2005년 2040년대 총에너지의 15%를 수소가 대체한다는 국가 차원의 수

소경제 비전을 수립하고(산업자원부 (2005)), 수소의 제조, 이용, 저장·공급과 제도 및 정책 분야의 로드맵을 수립하였다. 〈표 1〉에 정부 주도로 추진되고 있는 우리나라의 수소경제 진입 기술 개발 현황을 요약하였다.

수소의 저장·수송 및 이용 기술은 2020년대 상용화를 목표로 기술 개발이 진행되고 있다. 수소 생산 기술은 기존의 화석 연료를 이용한 수소 생산으로부터 기술의 발전에 따라 재생 에너지와 원자력을 이용한 청정 수소 생산으로 전환하는 시나리오이다.

청정 수소 생산 기술의 상용화 예상 연도는 2030년대로 기술 개발 진도가 타기술에 비하여 늦다. 따라서 수소경제 조기 진입에 요구되는 기술 개발 수준의 균형 유지를 위하여, 청정 수소 생산 기술 개발에 국가 차원의 투자 확대가 요구된다.

특히 기술 주도형 기술인 원자력수소는 부존 자원이 취약한 우리나라에서 해외 자원 예측을 탈피한 녹색 성장 동력을 제공할 수



〈그림 1〉 미래 에너지로서 수소의 수요처

있다. 또한 좁은 지형적 여건의 우리나라에서 에너지 밀도가 높은 원자력수소는 국토의 효율적 이용을 가능하게 하므로 수소경제 진입에 요구되는 대량 수소 생산의 현실적 방안이다. 현재의 수소의 주요 수요처는 정유와 석유화학 산업으로, 2005년 현재 세계 약 5천만톤, 우리나라는 약 1백만톤의 수소를 생산하고 있다. 우리나라의 경우 대부분 화석 연료 공정열을 이용한 증기 개질 방법으로 수소를 생산하고 있으며, 자가 생산 및 소비 형태를 취하고 있다.

최근 정유 제품의 황 함량 규제 로 정유사의 수소의 수요는 현재 78만톤/년에서, 2020년에는 116만톤/년 규모로 증가할 것으로 예측된다(한국 수소 및 신에너지학회 논문집 17권 1호 (2006)).

최근 화석 연료 고갈 및 이산화탄소 저감 대책으로, 미국의 정유사는 기존의 화석 연료 공정열을 이용한 증기 개질 수소 생산 방법

을 고온가스로의 공정열을 이용한 증기 개질 수소 생산으로 대체할 의사를 표명하고 있다. 또한, 대량의 고온 증기를 사용하는 미국의 석유화학 산업체도 고온가스로의 공정열로 대체할 의사를 표명하고 있다.

수소경제 시대의 미래 에너지로서 수소는 기존의 수소 시장 외에도, 〈그림 1〉과 같이 수송, 분산 전원 및 가정용/휴대용 연료전지의 연료로, 그리고 포집 이산화탄소 재활용 메탄올 생산, 석탄 액화/기화 등 합성 연료 생산 등 이산화탄소 저감 신형 에너지 시장 등 다양한 산업의 원료로 활용될 것이다.

수소 시장 규모는 수소경제 시대에 진입하는 2020년대부터 급격히 성장하여, 2040년대의 수소 시장 규모는 세계 500조원/년(16,700만톤/년), 우리나라는 36조원/년(1,200만톤/년) 규모로 예측된다.

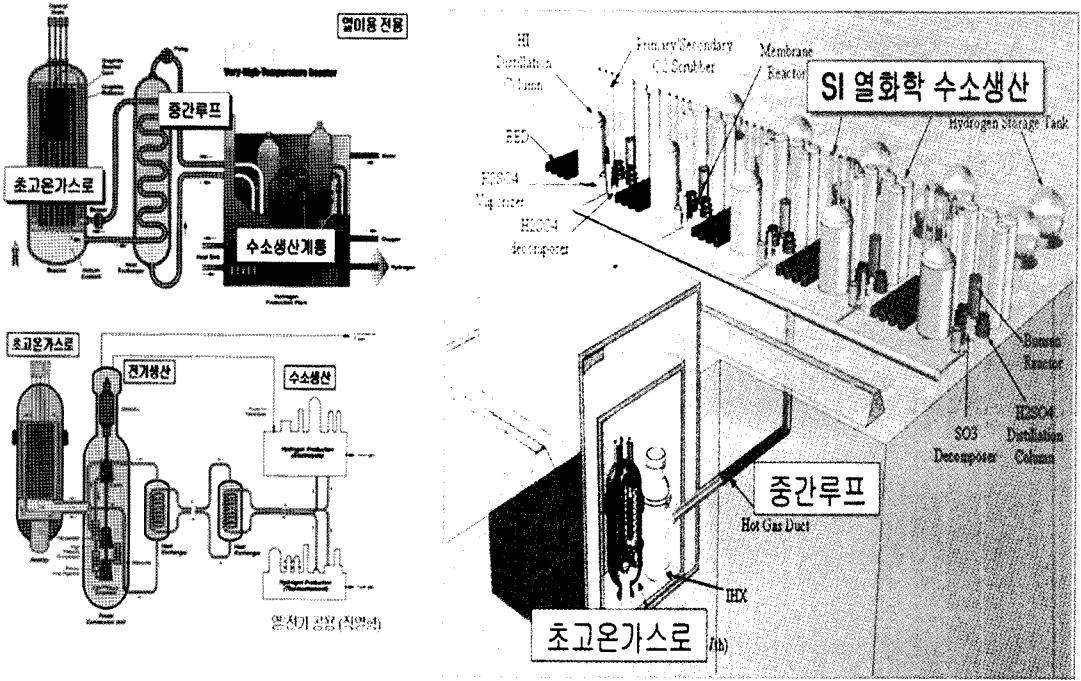
이러한 미래 에너지 시장에서

요구하는 대량의 수소 수요를 충족하기 위하여, 원자력을 이용한 대량 수소 공급은 필수적이다. 2040년대 국내 총수소 수요의 25%를 원자력수소로 공급할 경우, 총8개 이상의 원자력 수소 생산 시스템(6개 모듈, 36만톤/년 수소 생산)의 건설이 요구될 것으로 전망한다. 원자력수소

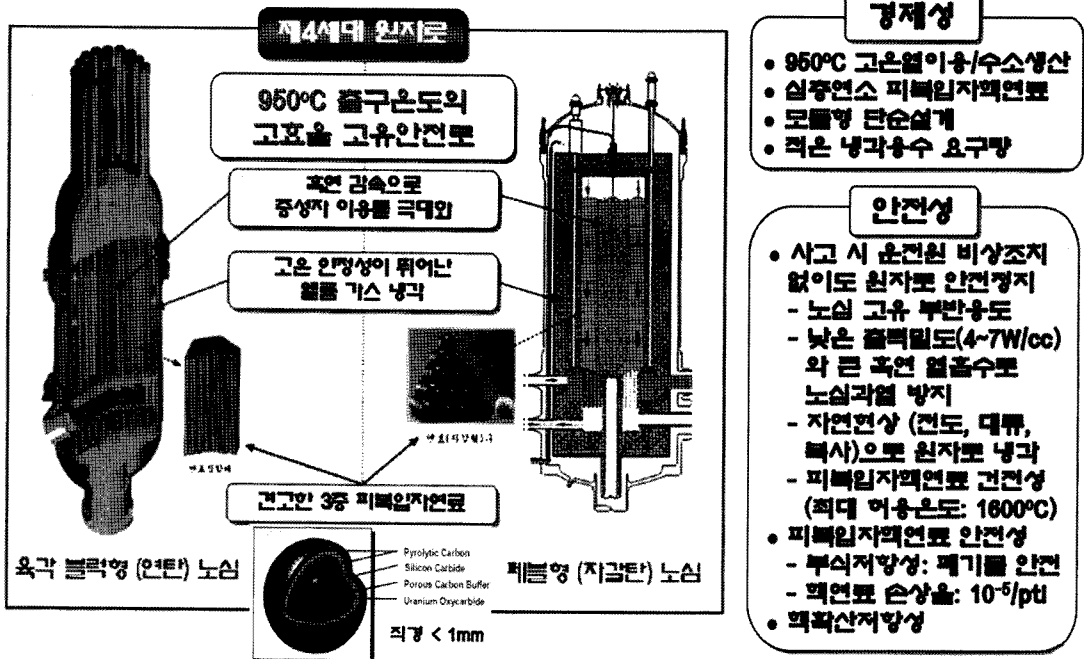
1. 원자력수소 생산 시스템

원자력수소는 950oC에서 안전 운전이 가능한 초고온가스로의 고열을 이용하여 물을 열화학 또는 고온 전기 분해 방법으로 직접 분해하여, 대량의 수소를 안전하며 깨끗하게 경제적으로 생산하는 기술이다. 〈그림 2〉에서 보듯이, 원자력수소 생산 시스템은 초고온가스로의 열 이용 전용 시스템 또는 미국 NGNP와 같이 열/전기 겸용 시스템의 형태를 갖는다.

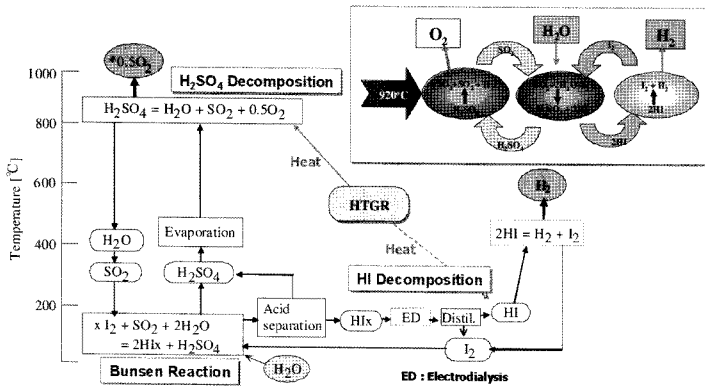
열 이용 시스템은 열화학적 방법으로, 전기 이용 시스템은 고온



〈그림 2〉 원자력수소 생산 시스템



〈그림 3〉 초고온가스로



〈그림 4〉 열화학 수소 생산 공정

전기 분해 방법으로 수소를 생산한다. 우리나라는 참조 시스템으로 용량 격상은 용이하나 도전적 기술인 요드-황 열화학 수소 생산 방법을 적용한 열 이용 전용 시스템을 선정하여 집중적인 연구·개발을 수행하고 있다.

고온 전기 분해 수소 생산 방법은 연료전지사업단에서 개발중인 고체 산화물 연료전지(SOFC: Solid Oxide Fuel Cell) 기술의 역기술이므로 중복 투자를 방지하여 시스템 개념 수준의 기반 연구를 수행하고 있다.

그림에서 보듯이, 원자력수소 생산 실증 시스템은 초고온가스로 계통, 원자로 계통의 고온열을 수소 생산 계통에 전달하는 중간 루프 계통, 그리고, 요드-황 열화학 수소 생산 계통으로 구성된다.

실증 시스템의 안전성 강화를 위하여 중간 루프 개념을 적용하고 초고온가스로를 지하에 위치하였다. 비원자력 등급인 수소 생산 계통의 이용률 향상을 위하여 요드-황 수소 생산 계통은 5개의 모듈로 구성하였다.

상용 시스템의 열출력은 600MWth 규모이나, 실증 시스템의 열출력은 200MWth급으로 설정하였다. 이는 압력 용기의 국내 제조성(직경 6.5m 이하), 실증 시스템의 운영·유지비(약 400억원 이상) 확보 및 상용 시스템의 운전·안전성 실증 scalability를 고려하여 설정하였다. 원자력수소 생산 시스템의 수소 생산 효율 목표는 45%이다. 2. 초고온가스로

초고온가스로는 950°C 초고온 운전 조건에서 안전 운전이 가능한 열중성자 원자로로, 고온열을 이용한 수소 생산 및 고효율 전력 생산이 가능한 제4세대 원자로이다.

초고온가스로는 초고온 운전을 위하여 고온 안정성이 뛰어난 헬륨을 냉각재로, 중성자 감속을 위하여 흑연을 감속재로 사용하며, 내열성이 뛰어난 피복 입자 핵연료를 사용하는 것 외에는 기존의 가압경수로의 원리와 동일하다.

특히, 초고온가스로는 낮은 출력 밀도(4~7 W/cc)와 노심 고유 부반응도로, 사고시에도 별도의

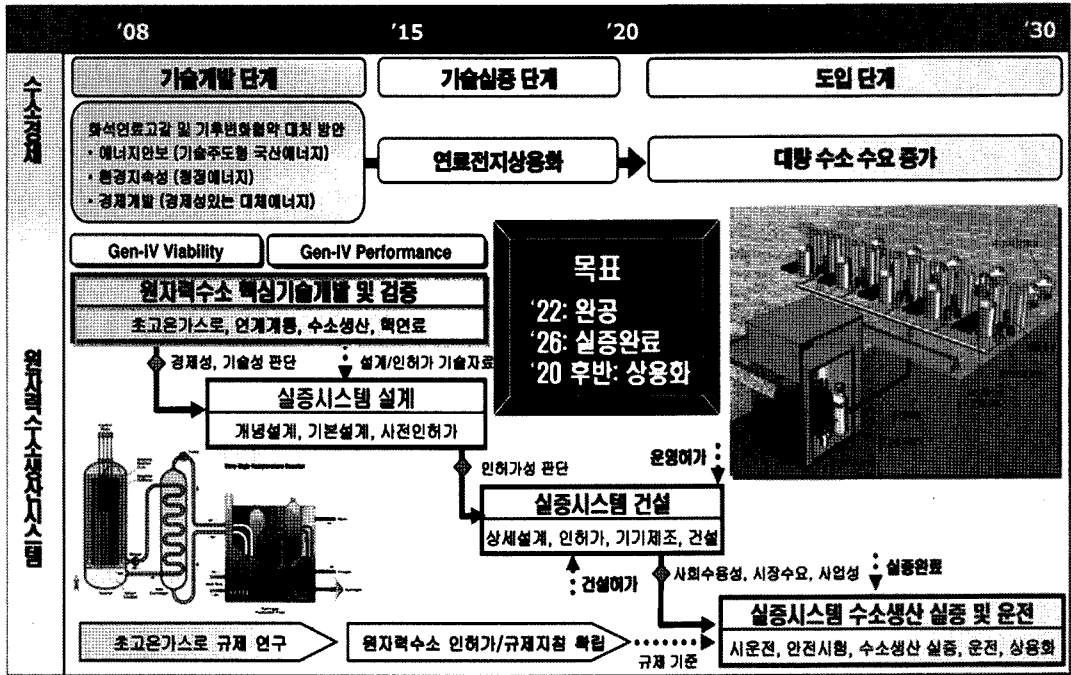
운전원의 비상 조치 없이 자연 현상(열전도, 복사열 전달 및 자연 대류 등)만으로 원자로의 안전 정지가 가능한 고유 안전로이므로, 주민 수용성 측면에서 강점을 갖는다.

초고온가스로는 〈그림 3〉에서 보듯이, 핵연료체의 형태에 따라 미국에서 개발한 블록형 노심과 독일을 원료로 하는 폐블형 노심으로 구분된다. 두 노심 모두 직경 0.5mm의 연료 핵입자를 규화탄소 등으로 다중 피복한 직경 1mm 이하의 피복 입자 핵연료를 사용하는 점에서 기반 기술은 같으며, 핵연료체의 형태에 따라 블록형과 폐블형으로 구분된다.

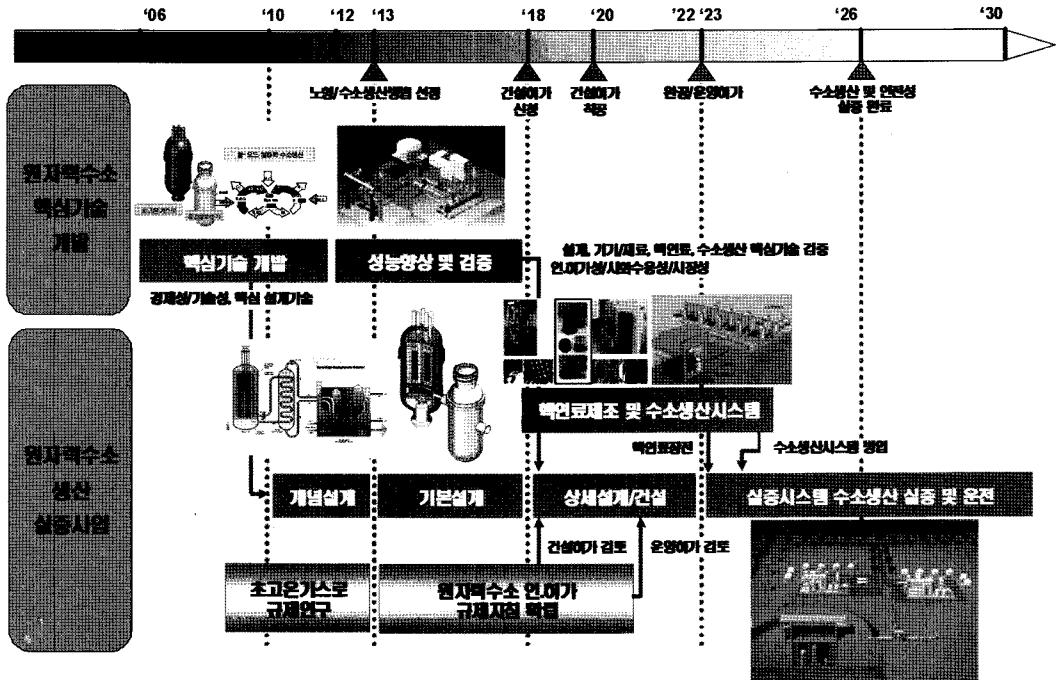
블록형 노심은 경수로와 같이 피복 입자 핵연료를 펠렛 형태로 가공하여 흑연 블록체에 장입하고 흑연 블록은 고정된 노심 위치에 장전 및 재장전 된다. 폐블형 노심은 피복 입자 핵연료를 공 형태로 가공하여 노심에 분산 장전하고, 가동중 재장전이 가능한 노심 개념이다.

피복 입자 핵연료는 고온 안전성과 핵분열 생성물 역류성 및 부식 건전성이 뛰어나므로, 초고온 운전의 달성, 핵연료 심층 연소(60~70% FIMA(Fissions per Initial Mass Atom)) 및 사용후 핵연료의 저장에 강점을 갖는다. 두 핵연료체 형태 및 노심은 각각 장·단점이 있어, 연구·개발 단계에서는 두 형태 모두에 대한 연구를 진행하고 있다. 3. 요드-황 열화학 수소 생산 공정

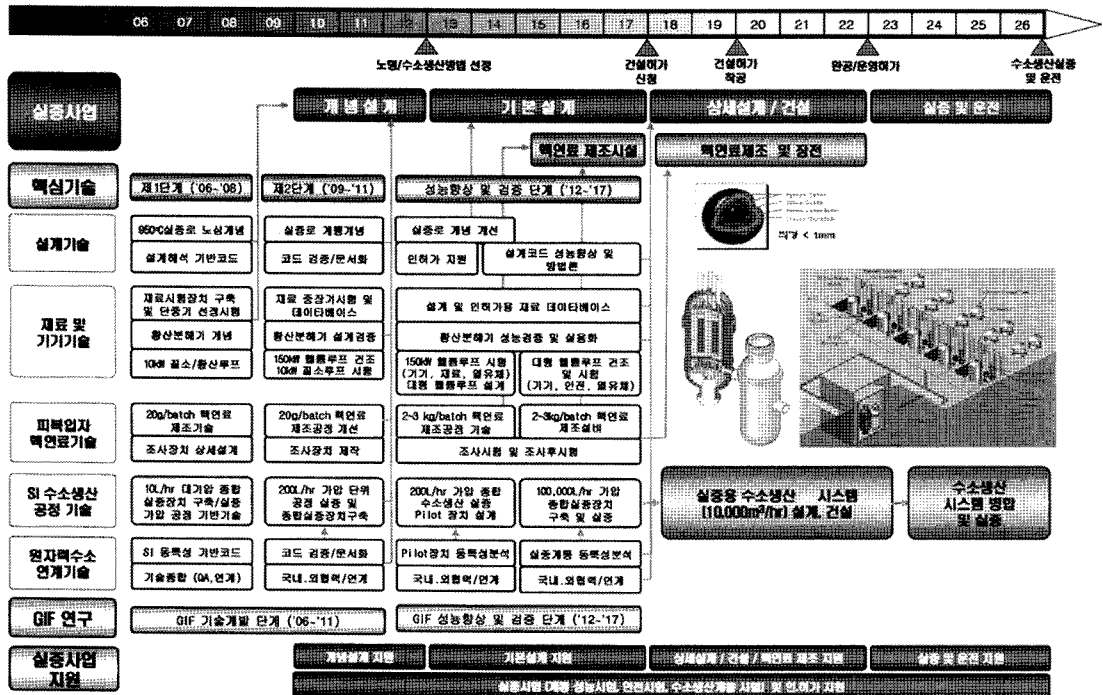
요드-황 열화학 수소 생산 공



〈그림 5〉 원자력 이용 수소 생산 시스템 개발 장기 추진 계획



〈그림 6〉 원자력 이용 수소 생산 시스템 개발 주요 일정



〈그림 7〉 원자력수소 핵심 기술 성과 지도와 실증 사업

정은 〈그림 4〉와 같이 분젠 공정, 황산 분해공정, 요드화수소 분해 공정으로 구성된 폐회로 공정으로, 물을 입력으로 수소와 산소를 생산한다.

분젠 공정은 외부에서 물을 공급받아 황산과 요드화수소를 생성한다. 생성된 황산은 황산 분해 공정에서 증발 및 삼산화황 분해 공정을 거쳐 이산화황 가스와 산소로 분해되며, 이산화황은 분젠 공정으로 재순환되고 산소는 분리 채집된다.

분젠반응에서 생산된 요드화수소는 요드화수소 분해 공정에서 수소와 요드로 분해되어, 요드는 분젠 반응으로 재순환되고 생성된 수소는 분리 채집된다.

본 공정에서 황산 분해 공정과

요드화 수소 분해 공정은 흡열 공정으로, 초고온가스로의 고열이 전달되는 공정이다.

원자력 이용 수소 생산 시스템 개발 장기 추진 계획

1. 원자력수소사업 추진 현황

우리나라도 2020년대 수소경제 진입을 목표로 2004년부터 교육과학기술부의 「원자력수소 생산 기술 개발 및 실증 사업」으로 본격적인 원자력수소의 연구·개발에 착수하였다.

사업은 한국원자력연구원 주도하에 국내 전문성 활용의 극대화를 위하여 초고온가스로 기술은 한국원자력연구원이, 요드-황 열

화학 수소 생산 기술은 한국에너지기술연구원과 한국과학기술원의 협동 연구로, 기초 기반 기술은 학계의 위탁 연구로 수행되고 있다.

2006년 원자력수소 생산 시스템의 설계·건설·실증을 위한 ‘원자력수소 실증 사업’은 향후 범부처적 사업으로 추진한다는 정부의 결정에 따라, 한국원자력 연구원은 초고온가스로 및 요드-황 열화학 수소 생산의 핵심 원천 기술 개발과 필수 자립 기술 확보를 위한 ‘원자력수소 핵심 기술 개발’ 연구·개발에 집중하고 있다.

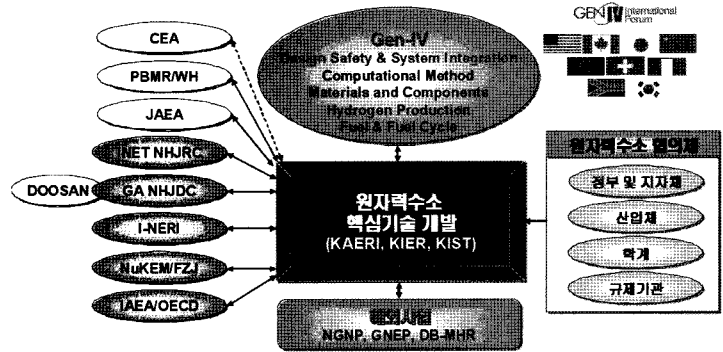
본 연구는 제3차 원자력진흥종합계획(2006), 국가 R&D 사업 Total Roadmap(2006)의 국가

중점 육성 기술 33개 특성화 기술로, 그리고, 교육과학기술부의 기 후 변화 대응 사업의 일환으로 수행되고 있다.

2. 원자력 이용 수소 생산 시스템 개발 장기 추진 계획

2008년 12월 22일 제255차 원자력위원회에서 국가 수소경제 조기 진입을 달성하고 저탄소 녹색 성장에 근간한 국가 발전 동력을 제공하기 위한 「원자력 이용 수소 생산 시스템 개발 장기 추진 계획」이 의결되었다. 사업의 목표는 2022년까지 원자력수소 시스템을 완공하고, 2026년까지 수소 생산을 실증하는 것이다.

이로써 장기간이 소요되는 원자력수소 연구·개발을 일관성 있고 체계적으로 추진하고, 국제 사회에서 원자력 선도국으로서의 지위 확보 및 전략적 공동 연구를 추진할 수 있는 틀을 갖추게 되었다.



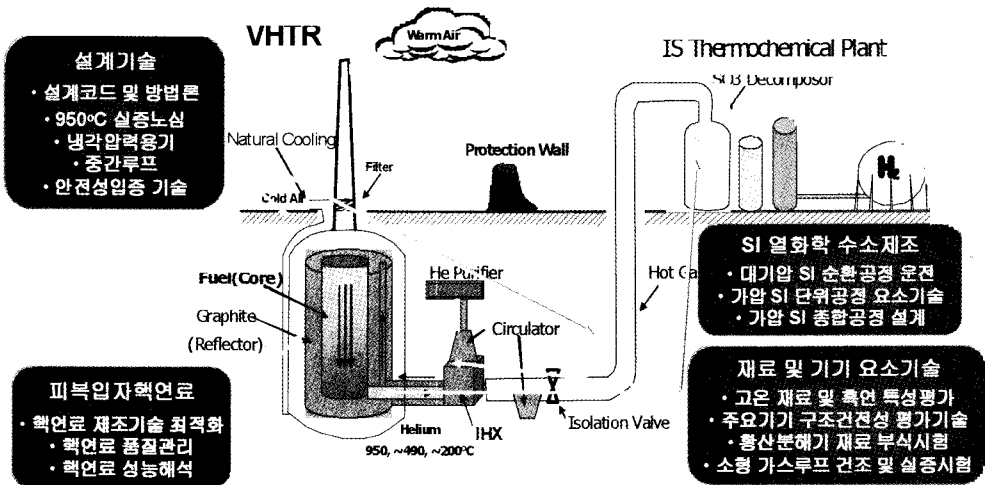
〈그림 8〉 원자력수소 국제 및 국내 협력 체계

원자력 이용 수소 생산 시스템 개발 장기 추진 계획은 〈그림 5〉와 같이, 국가 수소경제 비전에 맞추어 2020년대 중반 대량 원자력 수소 생산 실증을 목표로 수립되었다.

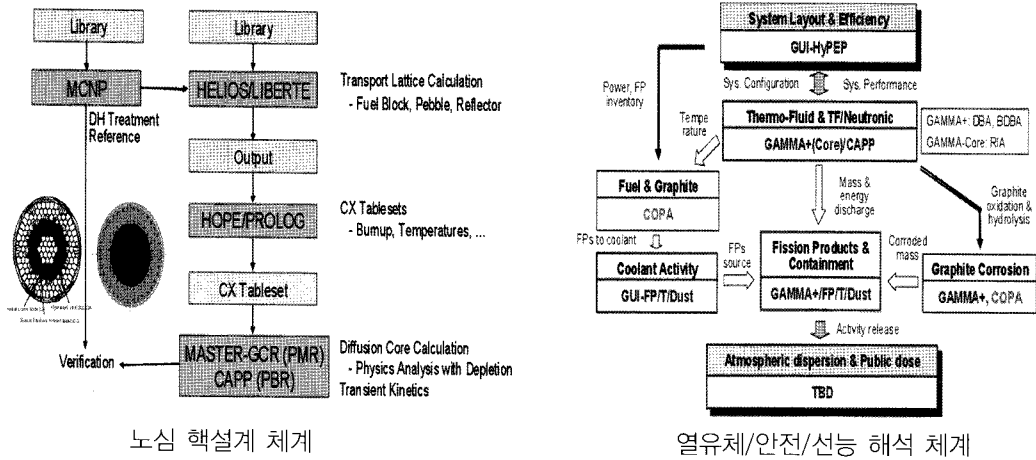
장기 추진 계획은 원자력수소 핵심 기술 개발 사업과 원자력수소 생산 실증 시스템 설계·건설·실증 사업(이하 ‘원자력수소 생산 실증 사업’)으로 구성된다.

원자력수소 핵심 기술 개발 사

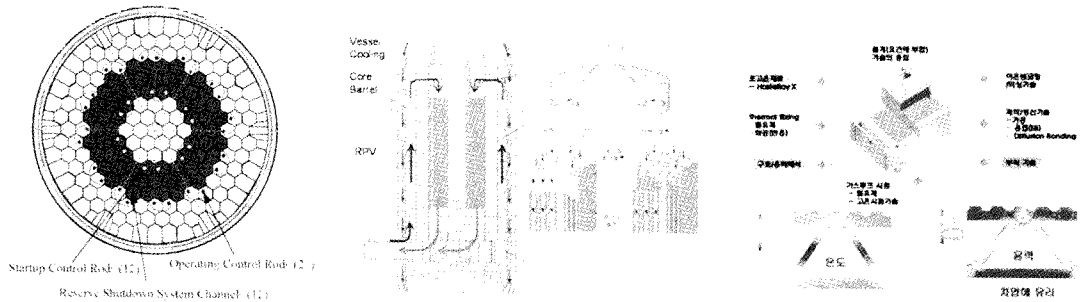
업은 정부 주도하에 국제 경쟁력 있는 핵심 원천 기술 확보 및 실증 사업 추진에 요구되는 필수 자립 기술의 개발 및 검증을 목표로 하며, 원자력수소 생산 실증 사업은 범부처적 사업으로 실증 시스템의 설계·건설·실증을 목표로 한다. 원자력수소 핵심 기술 개발의 주요 일정은 〈그림 6〉과 같이 2011년까지 초고온가스로 및 요드-황 열화학 수소 생산의 핵심 기술을 개발·검증하고, 2017년까지 원



〈그림 9〉 원자력수소 핵심 기술 개발 연구 내용



〈그림 10〉 고유 설계 해석 체계



〈그림 11〉 고유 노심, 냉각 압력 용기 및 공정열교환기 개념

자력수소 생산 시스템의 핵심 기술의 성능을 향상·검증하고 기술 현안을 해소하는 것이다.

핵심 기술 사업은 실증 사업의 추진과 세계 시장 선점을 위하여 요구되는 핵심 원천 기술과 필수 자립 기술을 개발하며, 개발된 기술은 실증 사업의 설계·건설·실증을 위하여 요구되는 단계별 핵심 기술로 제공된다.

원자력수소 생산 실증 시스템은 초고온가스로 실증 시스템과

요드-황 열화학 수소 생산 실증 시스템으로 구성된다.

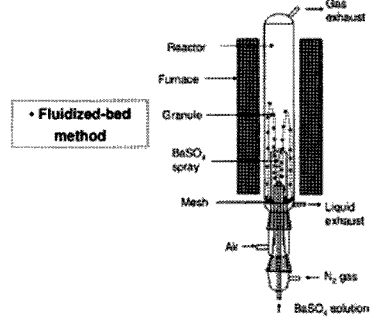
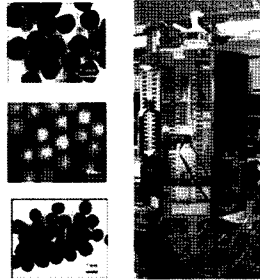
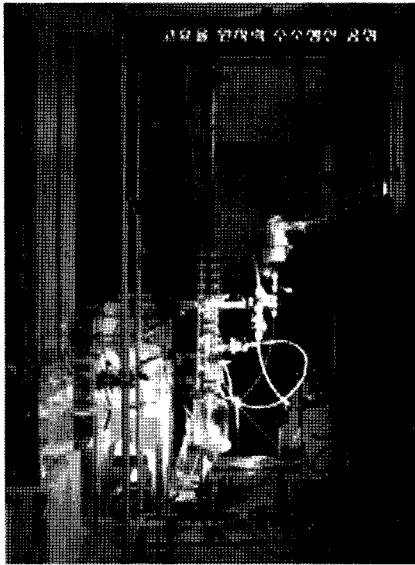
원자력수소 생산 실증 사업은 기술적 리스크가 대부분 제거되는 2010년 이후 착수한다. 초고온가스로 실증시스템은 개념 설계(3년), 기본 설계(5년), 상세 설계 및 건설(5년), 실증 및 운전 단계(4년)를 거쳐 2019년까지 건설 허가, 2022년까지 완공 및 운영 허가 취득을 목표로 한다. 건설 및 운영 허가 취득을 위한

규제 기관의 인·허가 기간을 각각 2년으로 설정하였다.

초기 노심 핵연료는 핵연료 제조 설비가 완공되는 2018년에 제조에 착수하여 실증 시스템의 완공 시점에서 노심에 장전된다.

요드-황 열화학 수소 생산 실증 시스템의 설계·건설은 2018년 착수하여 2022년 완공을 목표로 한다.

초고온가스로 및 수소 생산 실증 시스템의 완공 후 1년간의 개



〈그림 12〉 대기압 요드화수소 분해 실증 장치 및 황산 분해 촉매

별 시스템 시운전 및 안전성 시험 후, 2023년 초고온가스로와 수소 생산 실증 시스템을 병합한다. 이후 3년간의 수소 생산 및 안전성 실증을 통하여 2026년까지 원자력수소 생산의 실증을 완료할 계획이다.

3. 원자력수소 핵심 기술 개발 사업

가. 사업 개요

한국원자력연구원은 교육과학기술부의 원자력 연구·개발 사업으로 2006년부터 ‘원자력수소 핵심 기술 개발’ 사업을 수행하고 있다. 한국원자력연구원은 사업의 총괄 책임과 초고온가스로 및 수소 생산 연계 핵심 기술을 개발하고, 한국에너지기술연구원 및 한국과학기술연구원은 요드-황 열화학 수소 생산 핵심 기술을 개

발한다.

원자력수소 기술은 우리나라에 처음 도입되는 기술일뿐더러 세계적으로도 초기 기술 개발 단계이다. 따라서 원자력수소의 기반 기술 확보와 국제 경쟁력 있는 핵심 원천 기술의 개발은 향후 원자력수소 실증 사업의 수행과 세계 기술 시장 선점에 매우 중요하다.

이를 반영하여, 사업의 목표를 세계 시장 선점을 위한 핵심 원천 기술의 개발·검증과 도전적 기술 현안 해소, 그리고, 원자력수소 실증 사업의 수행에 요구되는 필수 자립 기술의 확보로 설정하였다.

원자력수소의 도전 기술은 GIF (Gen-IV International Forum, 제4세대 원자력시스템 국제포럼) 초고온가스로 시스템 공동 연구로 개발한다.

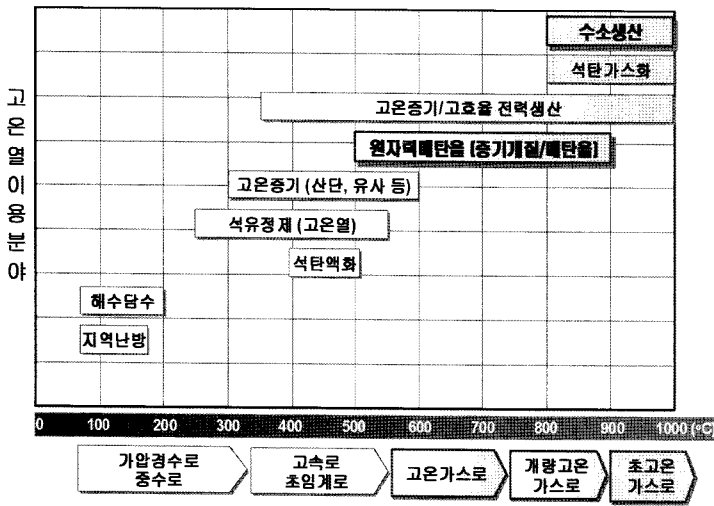
원자력수소 핵심 기술 개발 연구는 총12년간의 연구로, GIF 공

동 연구 개발 단계에 따라 기술 개발 단계(2006~2011)와 성능 향상 및 검증 단계(2012~2017)로 구분되어 있다.

현재 기술 개발 단계의 1단계 연구(2006~2008)를 종결하고, 2단계 연구(2009~2011)에 착수하였다. 1단계 연구를 통하여, 원자력수소 실증 시스템의 개념 설계 착수 수준의 핵심 기술을 확보하였으며, 이어지는 2단계 연구(2009~2011)는 실증 시스템 기본 설계 착수 수준의 핵심 기술의 개선 및 검증을 목표로 한다.

특히, 2단계 연구는 선택과 집중 차원에서 세계 시장 선점을 위한 국제 경쟁력 있는 핵심 도전 기술의 실증에 집중 투자하고 있다.

200L/hr 규모의 가압 수소 생산 단위 공정 skid 건조 및 종합 수소 생산 실증, 초고온/고압 헬륨 루프 건조 및 공정열교환기 설계 개념 및 성능 검증, 피복 입자



〈그림 13〉 고온가스로의 공정열 이용 잠재 시장

핵연료 제조 품질 개선 및 조사 성능 검증 등이 주요 실증 연구의 대상이다. 또한 이미 세계적 수준의 기술인 고유 설계 해석 전산 코드의 인·허가를 대비한 검증 및 문서화 등도 지속적인 연구 대상이다.

원자력수소 핵심 기술 개발 사업의 주요 목표는 원자력수소 실증 사업의 설계·건설·실증 단계별 필수 핵심 기술의 제공이다. 이에 따라 핵심 기술 개발의 일정 및 기술 수준을 원자력수소 실증 사업의 일정 및 요구 기술 수준에 따라 설정하였다. 〈그림 7〉에 원자력수소 핵심 기술 개발 성과 지도와 실증 사업의 연계를 제시하였다. 미국, 독일 등 해외 선진국은 이미 1960년대 고온가스로 기술 개발에 착수하여, 연구용 및 상용 고온가스로 시스템의 설계·건설·운전 경험을 보유하고 있다.

우리나라는 2020년대 들어 원

자력수소사업을 통하여 고온가스로 기술을 처음 도입하기 시작한 후발 주자로, 부족 기술 확보 및 기술 격차 해소를 위한 선진 기술 보유국과의 국제 협력은 무엇보다 중요하다.

이를 위하여 본 사업에서는 〈그림 8〉에 제시된 바와 같이 GIF, OECD, IAEA 등 다자간 협력과 미국, 독일, 중국, 일본, 남아공 등의 선진 기술 보유기관과의 양자간 협력 체계를 구축하였다. 또한 원자력수소 실증 사업의 기술 기반 구축과 Synergy 효과 극대화를 위하여, 국내 산·학·연이 참여하는 원자력수소협의체 구성을 추진하고 있다. GIF 초고온가스로 시스템 개발에는 현재 미국, 일본, 프랑스, 스위스, 유럽연합, 중국, 캐나다, 한국 등 8개국이 참여하고 있으며, 남아공과 러시아가 추가로 참여할 예정이다.

우리나라는 GIF 연구의 수소 생산(2008년 3월 발효), 핵연료

및 핵주기(2008년 1월 발효), 재료(2009년 초 발효 예정) 및 코드 방법론/검증(2009년 중반 발효 예정) 등 4개 프로젝트에 참여하여 원자력수소의 도전 기술을 공동으로 개발하고 있다.

이와 병행하여, 선진 기술 보유 기관과의 양자간 협력으로 부족 기술 확보 및 기술 선진화를 도모하고 있다. 2005년 블록형 원자로의 개발자인 미국 GA(General Atomics)와 한·미 원자력수소 공동 개발 센터를, 2004년 10MWth급 펄스형 연구로를 보유한 중국 칭화대학교와 한·중 원자력수소공동연구센터를 설립하여 다양한 공동 연구를 수행하고 있다.

피복 입자 핵연료 제조 기술 확보를 위하여 독일의 NuKEM으로부터 Lab 규모(2~3kg/batch)의 핵연료 제조 기술을 전수받고 있다.

또한 미국의 국립연구소인 INL(Idaho National Laboratory)과 ANL(Argonne National Laboratory)과는 I-NERI 사업을 통하여 핵심 도전 기술을 개발하고 있으며, 일본 JAEA(Japan Atomic Energy Agency), 남아공 PBMR(Pebble Bed Modular Reactor), 프랑스 원자력청과는 주기적인 워크숍을 통하여 기술 정보를 교환하고 있다.

나. 1단계 연구(2006~2008) 주요 연구 내용 및 성과

〈그림 9〉에 1단계 주요 연구 내용을 제시하였다. 원자력수소

핵심 기술은 크게 초고온가스로 설계 기술, 고온 재료 및 기기 요소 기술, 피복 입자 핵연료 및 열 화학 수소 생산 기술로 구성된다. 초고온가스로의 핵심 설계 기술로 <그림 10>과 같이 핵설계, 계통 성능 및 안전 해석 기반 코드를 고유 원천 기술로 개발하고, 최신 기술을 접목한 핵설계, 열유체 설계, 기계 설계 및 안전성 해석 체계를 구축하였다.

또한, 대표적인 설계 기준 및 설계 기준 초과 사고의 안전성 분석, 리스크 평가 등을 통하여 실증로의 안전성을 평가하였다.

개발 기술을 국내 산업체에 전수함으로써 원자력수소 실증 사업 추진의 기반을 구축하였다.

설계 해석 코드는 지속적인 개선, 검증 및 문서화를 통하여 인·허가성을 확보하고, 해외 기술 시장 선점을 위한 핵심 기술로 활용될 것이다. 특히 고유 개발 코드의 우수성은 이를 적용한 해석 결과를 원자력 중주국인 미국에 역수출함으로써 입증되었다.

한국원자력연구원은 미국 에너지부의 원자력수소 사업인 차세대원자로(NGNP: Next Generation Nuclear Plant), 경수로 사용후핵연료의 고온가스로 공생 핵주기 사업인 국제핵에너지파트너십(GNEP: Global Nuclear Energy Partnership) 및 심층연소고온가스로(DB-MHR: Deep-Burn Modular Helium Reactor) 사업에 83만불 규모의 기술 용역 수출을 달성하였으며, 이어지는 후속 사업에도 지속 참여할 예정이

다. 또한 <그림 11>과 같이 950℃ 초고온 운전 조건에서 200MWth급 실증로의 노심, 냉각 압력 용기와 공정열교환기의 설계 개념을 고유 원천 기술로 확보하였다.

고유 노심 개념은 축방향 재장전, 독물봉 재배치, 농축도 영역화, 영역별 재장전 등 신기술을 도입함으로써, 기존 노심에 대비하여 노심 출력 밀도를 13~30% 상향한 경제성과 안전성이 향상된 노심 개념이다.

냉각 압력 용기 개념은 고온의 냉각재와 압력 경계와의 직접 접촉을 방지함으로써, 내고온 재료를 사용하는 압력 용기가 아닌 경수로형 압력 용기의 사용을 가능하게 한 개념이다. 이로써 압력 용기의 국내 제조성과 재료 수급성을 확보할 수 있다.

공정열교환기는 초고온가스로의 원자로 계통과 수소 생산 공정을 연결하는 핵심 기기로 1차측에는 헬륨가스가, 2차측에는 삼산화황 가스가 흐르는 황산 분해기이다.

본 연구에서는 해외에서 개발 중인 세라믹형 열교환기의 제조성, 성능 및 용량 격상 제한성 문제 해소를 위하여, 금속제 기반 Hybrid형 고유 설계 개념을 개발하였다.

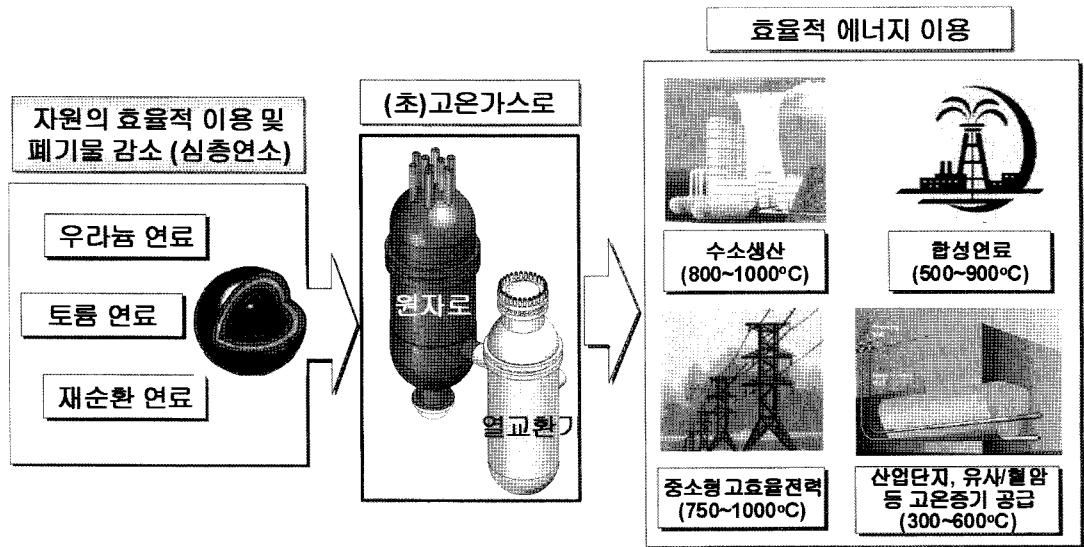
1차측은 Printed Circuit 형태의 유로를 갖으며, 2차측은 황산 분해 촉매의 장입이 가능한 Plate-Fin 형태의 유로를 갖는다. 2차측 열전대 금속제 표면의 내부식성 향상을 위하여, 규화탄소계 피복 및 혼합 표면 처리 기술을 접

목시킴으로써, 기존의 세라믹재에 비하여 제조성과 열전달 성능을 혁신적으로 향상시킨 기술이다.

현재 공정열교환기 시제품을 제조하여 10kW급 초고온 질소/황산 루프에서 개념 실증 시험을 수행하고 있다. 본 기술에 대한 지적소유권을 확보하였으며, 개발 기술의 우수성은 미국의 NGNP 사업에서도 이를 선택 사항으로 고려하고 있는 점으로도 알 수 있다. 초고온 재료 연구는 GIF 연구와 연계하여 수행하고 있다. 1단계 연구에서는 재료 시험 장치를 구축하고 압력 용기(9Cr1Mo) 및 내부 구조물(SiC-SiC) 및 열교환기(A617) 재료의 단·중기적인 특성 시험과 흑연 재료 및 산화 특성 평가 시험, 그리고 황산 환경에서 공정열교환기 재료 선정을 위한 부식 시험을 수행하였다.

피복 입자 핵연료의 제조 기술 확보를 위하여 실험실 규모(20g/batch)의 핵연료 제조 설비를 구축하여 연료 핵입자의 제조 및 피복 공정의 제조 조건을 최적화하였으며, 핵연료 품질 관리를 위한 검사 및 특성 분석 기술을 개발하였다. 또한 피복 입자 핵연료 성능 분석을 위한 전산 해석 기반 코드를 확보하였다.

요드-황 열화학 수소 생산 기술은 세계적으로도 개발 중인 도전 기술로, 1단계 연구를 통하여 대기압 조건에서 황산 분해, 분젠 반응 및 요드화수소 분해 공정 기반 기술을 확보하였다.



〈그림 14〉 미래 에너지 시장에서 초고온가스로의 역할

특히 요드화수소 분해 공정은 수소 생산 효율에 가장 큰 영향을 미치는 핵심 공정으로, 본 연구에서는 요드의 재순환 공정과 고효율 요드화수소 분해 촉매를 개발함으로써 공정의 단순화 및 저온 운전을 가능하게 하였다.

〈그림 12〉와 같이 요드화수소 분해 공정의 대기압 시험을 통하여 6시간 동안 3.5L/hr의 수소 생산을 실증하였다.

또한 황산 분해용 촉매와 SO₂/O₂ 분리 기술 등 핵심 원천 기술 확보함으로써 원자력수소 대량 생산을 위한 원천 핵심 기술을 확보하고 세계 시장에서 기술을 선점할 수 있는 기반을 구축하였다. 현재는 가압 중합 공정 실증을 위한 단위 공정 기술 및 skid를 개발하고 있다. 미래 에너지 시장에서 초고온가스로의 역할 화석 연료 고갈과 기후 변화 대응으로 저탄소 녹색 성장에 기반

한 청정 에너지 기술의 개발이 세계적인 현안으로 부각되고 있다.

〈International Energy Outlook〉(2007)에 따르면, 2004년 현재 전 세계 에너지의 86%를 화석 연료에 의존하고 있으며, 화석 연료의 소비는 산업체(35.6%), 전력 생산(30.2%), 수송(22.4%) 분야 순이다. 따라서 이들 3개 분야에서 화석 연료 대체를 위한 미래 청정 에너지 기술의 개발은 무엇보다 시급하다.

현재 원자력은 전 세계 에너지 수요의 약 6%를 담당하고 있으나, 전력 생산 분야에만 16%를 공급하고 있다. 따라서 화석연료 대체를 위한 1차 에너지의 확고한 대안이 없는 현 시점에서, 전력 생산 분야 외에도 산업체 공정 열 공급 및 수송 분야에 이산화탄소 배출이 없는 원자력의 역할 확대는 피할 수 없는 현실이다.

현재까지 원자력의 이용은 경

수로 기술에 기반한 대용량 전력 생산이 위주였다. 그러나 최근 화석 연료 고갈과 기후 변화 대응으로 산업체의 공정열 공급과 수송 연료에 사용되는 화석 연료의 대체 요구가 커지면서 원자력을 이용한 고온열 공급 및 청정 수소 생산의 요구가 커지고 있다. 또한 중동, 북아프리카, 동남아 등 개발도상국의 원자력 선호도가 높아지면서 중소형 규모의 고효율 전력 생산용 원자로의 개발 수요도 증가하고 있다.

고온가스로는 고온열 공급과 고효율 수소 및 전력 생산이 가능한 원자로로, 원자력 이용 신형 에너지 시장에 가장 적합한 형태의 원자로이다.

고온가스로는 출구 온도 750℃ 부근의 고온가스로와 850℃까지의 개량고온가스로, 그리고 950℃ 부근의 초고온가스로로 구분할 수 있다.

고온가스로 기술은 해외에 설계·건설·운전 경험이 있는 성숙 기술이며, 개량고온가스로 기술은 해외에 설계 경험이 있는 준성숙 기술로, 초고온가스로 기술은 현재 개발중인 미래 기술로 분류된다.

최대 950°C까지 고온열을 생산하는 초고온가스로는 <그림 13>에서 보듯이 원자력수소 생산 외에도 공정열 공급 시장 및 고효율 중소형 전력 생산 시장 진입에 최적의 조건을 갖는다.

기존 산업체의 고온 증기, 석유 정제 등 기존의 화석 연료에 기반한 공정열 공급 시장을 대체할 수 있으며, 포집 이산화탄소 재활용 합성 연료 생산 등 신형 합성 연료 시장 진입이 가능하다.

특히, 개량고온가스로 기술은 미래 기술이 초고온가스로에 비하여 초고온 재료 및 기기 설계 등에 현안 문제가 없는 준성숙 기술로, 당면한 화석 연료 고갈과 기후 변화에 대응한 증기 개질 수소 생산, 원자력메탄올 생산과 고효율 전력 생산, 산업 단지 증기 공급 및 해수 담수 등에 화석 연료를 대체할 수 있는 중기적 대안 기술이다.

또한, 고온가스로의 고온열을 이용한 고효율 중소형 전력 생산

은 공기 냉각이 가능하므로, 요구 냉각 용수량이 적어 전력 그리드가 취약한 개발도상국의 내륙 부지나 물 부족 지역에 적합하다. 특히 피복 입자 핵연료의 핵확산 저항성은 중동 및 북아프리카 지역의 전력 시장 진입에 강점을 갖는다.

또한 초고온가스로의 심층 연소(60~70% FIMA) 성능은 기존의 우라늄 연료 외에도 토륨 및 사용후핵연료 재순환 초우라늄 노심 구성이 용이하게 하므로 핵연료 자원의 효율적 활용 및 고준위 폐기물 저감에 기여할 수 있다. <그림 14>에 미래 에너지 시장에서 초고온가스로의 역할을 도시하였다.

미래 에너지시장에서 공정열 공급 시장 규모는 현재 세계 1,606조원, 국내 64조원 규모에서, 2018년대에는 세계 1,960조원, 국내 82조원 규모로 증가할 것으로 예측한다(<World Energy Outlook>(2006)).

450MWth급 개량고온가스로 1기로 공정열 공급시, 화석 연료 대체에 따른 96만톤/년의 이산화탄소 배출 감축 효과가 있다.

600MWth급 초고온가스로 1기로 연간 6만톤의 수소를 생산하여 수송 연료로 공급할 경우,

수소 생산용 화석 연료 대체에 따른 이산화탄소 배출 감축 128만톤/년, 수송 연료 대체에 따른 이산화탄소 배출 감축 52만톤/년, 1,700억원/년의 석유 수입을 절감할 수 있다.

개발도상국의 중소형 원자력 시장 규모는 2030년까지 약 350조원 규모로 예측한다.

결론

제 255차 원자력위원회의 원자력 이용 수소 생산 시스템 개발 장기 추진 계획 의결로, 국가 수소경제 조기 진입을 위한 대량 수소 생산 기술 개발의 이정표가 마련되었다.

기술 주도형 청정 원자력수소 생산은 환경 문제 해결, 국가 경제의 지속 가능한 성장 및 에너지 안보 확보 등 저탄소 녹색 성장의 원동력을 제공한다.

또한 초고온가스로 기술은 화석 연료 대체 공정열 공급 등 비전력 생산 분야에 다양하고 효율적인 에너지의 공급이 가능한 녹색 기술로, 화석 연료 고갈 및 기후 변화에 현실적 해법을 제공할 수 있다. 